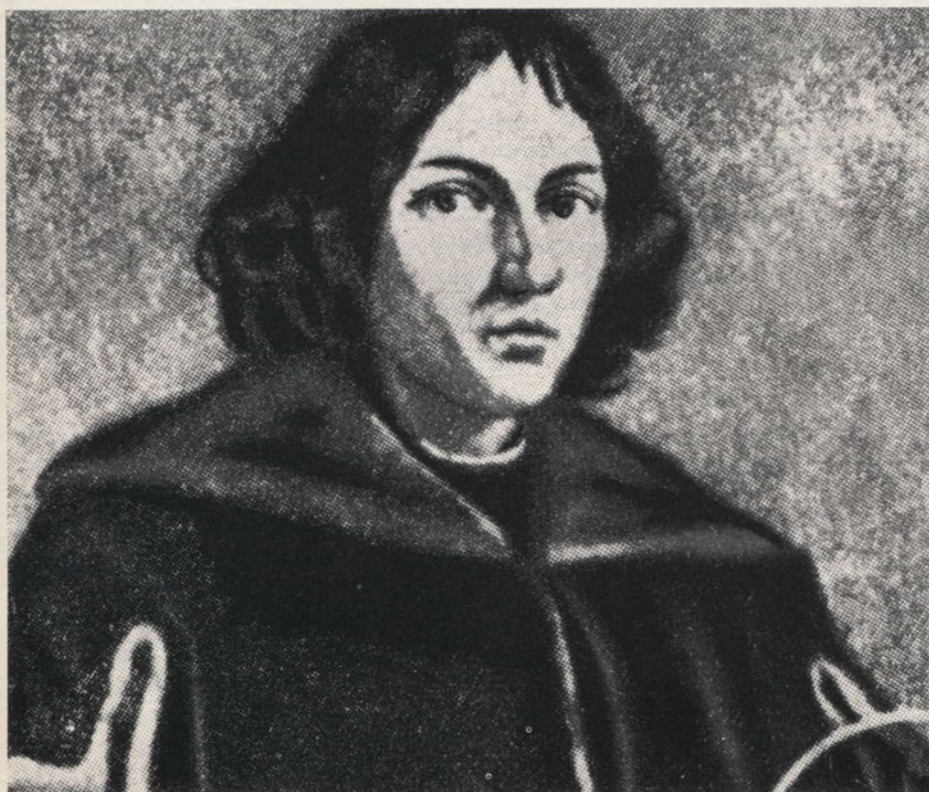
ALLE ORIGINI DELLA SCIENZA MODERNA: NICCOLO' COPERNICO

di Arcangelo Rossi

L'astronomia classica o tolemaica escogitava con molta disinvoltura circoli e sfere per spiegare i moti celesti, rispettando però sempre il principio che la terra è immobile al centro del mondo. Copernico propone invece di considerare il sole immobile al centro e la terra mobile intorno ad esso. Il suo sistema era però matematicamente equivalente a quello tolemaico nello studio dei singoli fenomeni celesti. La sua superiorità era infatti tutta nell'unità razionale, che preludeva alla scienza galileiana della natura.

Niccolò Copernico

L'astronomo polacco N. Copernico (Thorn, 1473-1543), ultimo degli astronomi antichi e primo dei moderni, rinnovò l'astronomia dando veste scientifica ad un'idea assai antica. L'idea che la terra sia un pianeta ruotante intorno al sole nella sfera delle stelle fisse che delimita il mondo aveva già ispirato nell'antichità l'opera astronomica di Aristarco di Samo (III secolo a. C.), mentre la più antica tradizione pitagorica sosteneva che al centro del mondo si trova un fuoco divino immobile e non la terra.

L'idea, come è noto, non ebbe successo per tutto il periodo antico e medievale fino a Copernico, e in verità neppure all'epoca di Copernico. Essa sembrava in troppo netto contrasto con il senso comune e la ragione, per cui la terra ci appare in quiete, e ci sembra impossibile che i corpi che sono alla sua superficie non le resterebbero indietro se essa si muovesse in folle corsa intorno al sole, e che non si disintegrerebbe essa stessa, per la forza centrifuga che sprigionerebbe, se anche solo ruotasse intorno al proprio asse; essendo questi due moti necessari per spiegare rispettivamente l'annuale percorso apparente del sole e dei pianeti attraverso i segni dello zodiaco, e l'avvicendarsi del dì e della notte, nell'ipotesi che il sole stia fermo e la terra si muova. Però l'astronomia tradizionale era stata sempre tollerante nell'ammettere espedienti particolari utili alla spiegazione, al calcolo e alla previsione dei moti celesti, anche se in contrasto con il senso comune e con la ragione; perciò lo stesso Copernico nella Prefazione al suo capolavoro *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Le rivoluzioni delle sfere celesti, 1543) motiva in primo luogo l'ipotesi del sole immobile e della terra-pianeta, che appariva allora indubbiamente assai spericolata, con l'utilità che essa avrebbe avuto per una determinazione più sicura dei moti celesti. Si era dunque sviluppata una mentalità « convenzionalistica » nell'astronomia tradizionale, che però, si badi bene, non appartiene più a Copernico, nonostante l'autore dell'Introduzione al Lettore del *De Revolutionibus,* Andrea Osiander, gliela attribuisca indebitamente; una mentalità per cui le sfere e circoli in cui si rappresenta-

no incastonati i corpi celesti dentro la sfera delle stelle fisse potevano essere immaginati con grande libertà, in gran numero e anche in sovrapposizione caotica, come semplici basi convenzionali per dimostrazioni geometriche dei moti celesti. Non importava che quelle sfere e quei circoli non si fossero mai visti, o perfino si impacciassero a vicenda, purché servissero a « salvare i fenomeni », e cioè i moti angolari apparenti dei pianeti e del sole lungo lo zodiaco, senza curarsi affatto della loro realtà fisica. Con tutto ciò, era però scontato che ogni astronomo accettasse le idee cosmologiche del proprio tempo elaborate dai filosofi in base al senso comune, e inserisse in esse la propria opera tecnica.
L'astronomia, prima fra le scienze a rendersi già nell'antichità relativamente autonoma dalla filosofia, per il suo precoce sviluppo tecnico, osservativo e matematico, non avanzava infatti la pretesa di mettere in discussione la grande sintesi cosmologica, che pretendeva invece di rispecchiare la struttura reale del mondo, per cui la terra era al centro del mondo delimitato dalla sfera delle stelle fisse, e lo spazio intermedio era riempito da una gerarchia di sfere, in cui i pianeti, la luna e il sole erano incastonati.

L'astronomia era paga di escogitare liberamente nel modo più spregiudicato e analitico particolari sfere e circoli, il cui unico scopo era di rendere conto nel modo più facile e con la massima precisione possibile dei moti dei corpi celesti, ferma restando la concezione vigente della struttura del mondo. Questa appariva tanto più indiscutibile in quanto già in Aristotele (384-322 a. C.) e ancor più nel Cristianesimo medievale assumeva addirittura un significato religioso e morale: in alto sta il cielo, simbolo e sede della perfezione divina, in basso, al centro la terra, sede del divenire, della corruzione, nelle cui viscere si trova addirittura l'inferno. Alla terra, grave e immobile, era negato anche il moto di rotazione diurna, che pure poteva spiegare in modo più economico il moto circolare apparente che la grande sfera delle stelle fisse compie ogni 24 ore, invece di far ruotare effettivamente, in modo tanto rapido, quella sfera così grande.

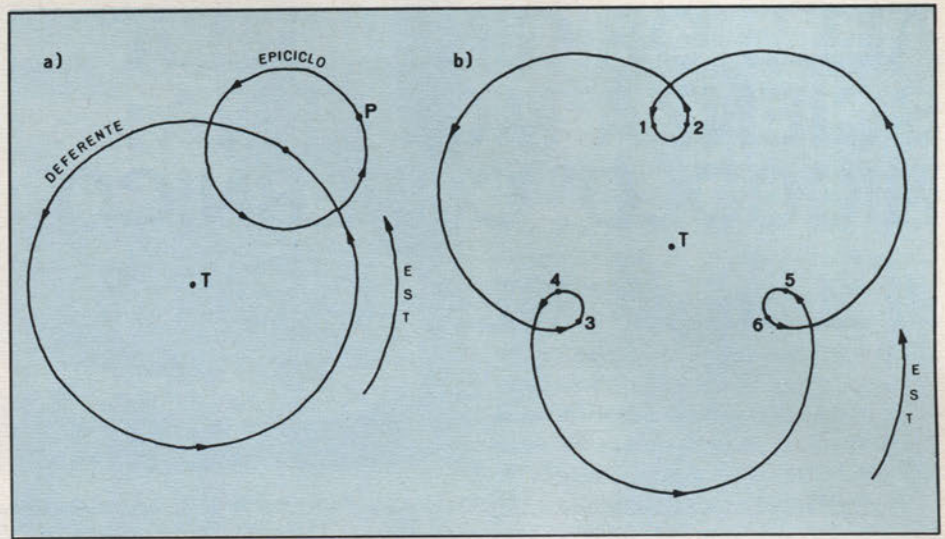



Fig. 1 *Il sistema base epiciclo maggiore deferente secondo Tolomeo. Un tipico deferente con epiciclo è mostrato in a). Il motonodoso e le retrocessioni (1-2; 3-4; 5-6) che generano sul piano dell'eclittica sono illustrati in b).*

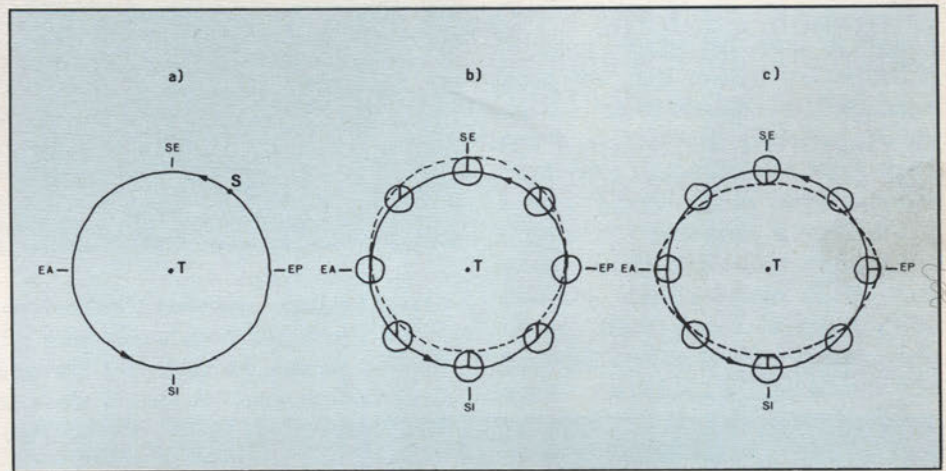



Fig. 2 *Epicicli minori a diverse velocità nel sistema tolemaico per spiegare le diverse velocità angolari apparenti dei corpi celesti mediante moti uniformi. In a) il sole, mosso dal solo deferente, con la terra al centro senza epiciclo, richiede lo stesso tempo per muoversi da EP (equinozio di primavera) ad EA (equinozio di autunno) che viceversa. In b) il moto congiunto di deferente ed epiciclo minore porta il sole lungo la linea tratteggiata: piú tempo è richiesto per andare da EP ad EA che viceversa. c) mostra la curva generata facendo ruotare l'epiciclo con velocità doppia.*

L'astronomia tolemaica e la sua importanza per Copernico

I circoli e le sfere escogitati con tutta libertà dagli astronomi per spiegare quei fenomeni celesti particolari, come il moto retrogrado dei pianeti, che il semplice schema cosmológico generale era impotente a determinare, erano di tipo diverso: 1) deferenti, quando ruotassero direttamente intorno alla terra; omocentrici o eccentrici a seconda che fossero concentrici o eccentrici con il globo terrestre; 2) epicicli, quando fossero incastonati in deferenti, di modo che il pianeta si muovesse lungo l'epiciclo che a sua volta si muovesse lungo il deferente. Questi « orbi » dovevano rendere conto anzitutto della diversa velocità dei pianeti e dell'irregolarità dei loro moti annui, incluse le stazioni e le retrocessioni. Fu Claudio Tolomeo, astronomo alessandrino (II secolo d. C.), a dare una

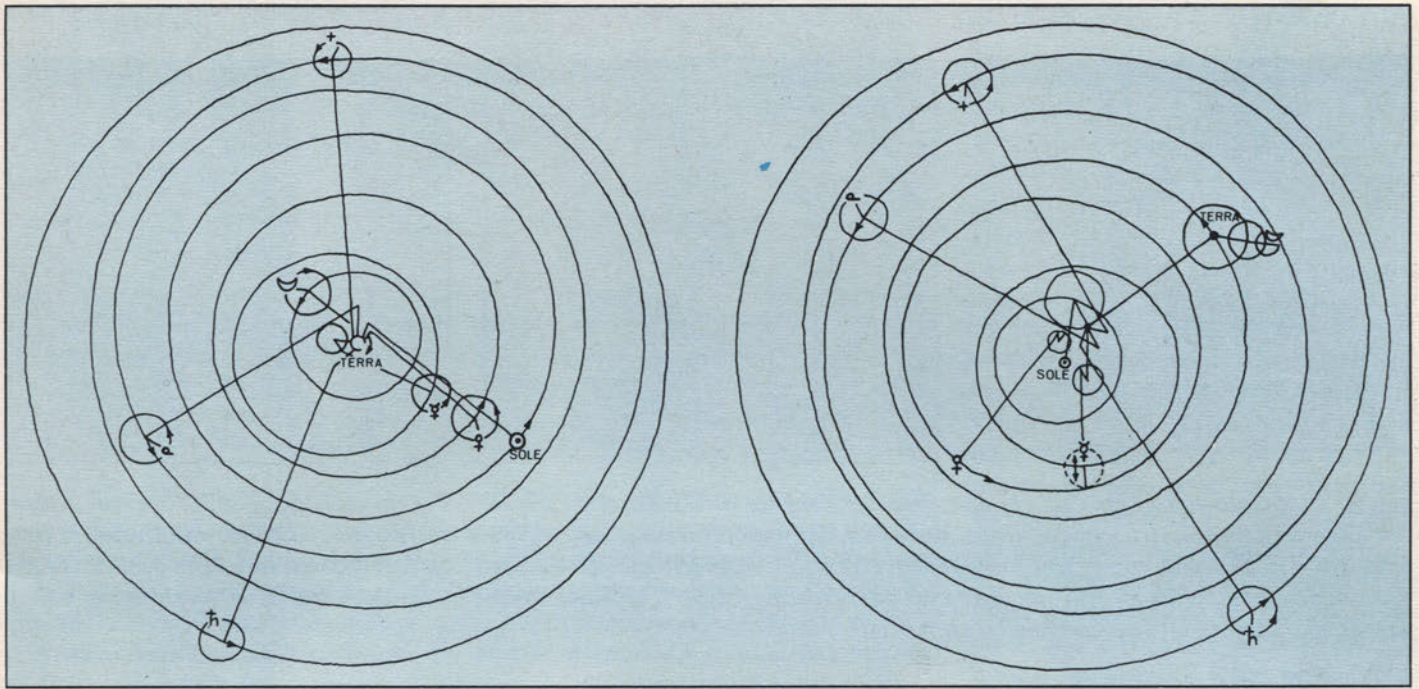



Fig. 3 *Confronto generale fra i sistemi tolemaico e copernicano. Nei due disegni le dimensioni relative dei raggi non sono esatte, ma i centri delle orbite planetarie sono orientati con la massima cura rispetto allo zodiaco. Nello schema tolemaico i centri di rotazione di Venere e Marte circondano il centro dell'orbita solare. Questo è indicato nel disegno dal raggio-vettore che parte dal sole; è vicino alla terra ma non coincide con essa. Pertanto il sistema non è geocentrico ma geostatico. I corpi celesti a partire dal centro sono: Terra, Luna, Mercurio, Venere, Sole, Marte, Giove, Saturno. Nel sistema di Copernico i centri di rotazione dei pianeti si raggruppano intorno a quello dell'orbita terrestre, distinto dal sole. Il sistema è pertanto eliostatico e non eliocentrico. I corpi celesti a partire dal centro sono nell'ordine: Sole, Mercurio, Venere, Terra, Luna, Marte, Giove, Saturno. A differenza che in Tolomeo, in Copernico comunque le distanze planetarie non sono piú arbitrarie.*

esposizione sistematica e accurata di questa astronomia, geostatica, non geocentrica, perché ormai Tolomeo rinuncia, essendo in contrasto con osservazioni più accurate, all'uso di omocentrici, e intorno alla terra immobile non fa ruotare che eccentrici, il cui centro è invece sempre intorno al centro dell'« orbe magno » in cui ruota il sole, un po' spostato rispetto alla terra. Da Tolomeo Copernico trasse non solo una conoscenza precisa dell'astronomia antica, ma anche dati e metodi (cioè eccentrici ed epicicli) da lui ancora usati essendo la sua opera debitrice agli antichi e ai medievali, inclusi gli arabi per quanto riguarda ad esempio i moti della luna, che si svolgono ancora per lui intorno e insieme alla terra. Perciò mi sono soffermato sull'astronomia precedente a Copernico. Anzitutto l'astronomia di quest'ultimo è eliostatica e non eliocentrica, come quella di Tolomeo era geostatica e non geocentrica, perché il centro dei moti planetari non è per lui proprio il sole, ma è sempre intorno al centro di quell'« orbe magno » privilegiato che era in Tolomeo l'orbita del sole lungo lo zodiaco, e in Copernico diventa l'orbita della terra intorno al sole. Tuttavia Copernico, a differenza di Tolomeo, ricerca nella sua astronomia la realtà degli « orbi » e non solo la loro semplicità e comodità d'uso. Inoltre, anche se il moto di rivoluzione della terra spiega da solo le grandi irregolarità dei moti planetari (stazioni e retrocessioni), facendole dipendere dal semplice rapporto fra il moto terrestre e quello dei pianeti, ed eliminando così i grandi epicicli tolemaici, non può tuttavia affatto escludere epicicli minori ed eccentrici per spiegare le diverse velocità angolari dei pianeti. Al contrario, dal momento che Copernico prende tremendamente sul serio il principio che i moti celesti siano sempre in ultima analisi moti circolari uniformi, per sue considerazioni di ordine estetico e filosofico, egli non accetta le semplificazioni e le riduzioni « convenzionalistiche » che Tolomeo ne fa, e quindi addirittura complica maggiormente il sistema del mondo. Tolomeo infatti aveva introdotto, per evitare di moltiplicare ancora di più di quanto si fosse fatto fino ad allora e avesse fatto egli stesso il numero delle sfere, lo stratagemma del cosiddetto punto equante, come punto immaginario, diverso sia dal centro del mondo (la terra), sia dal centro dell'eccentrico del pianeta, guardando dal quale soltanto, il moto del pianeta sembra svolgersi con velocità angolare uniforme. Così Tolomeo risparmiava un epiciclo per ogni pianeta, mentre Copernico, troppo fedele al principio del moto circolare uniforme effettivo, era costretto a farvi ricorso.

La ricerca copernicana di una sintesi armonica

Sicuramente anche a ciò allude Copernico quando afferma, nella Prefazio-

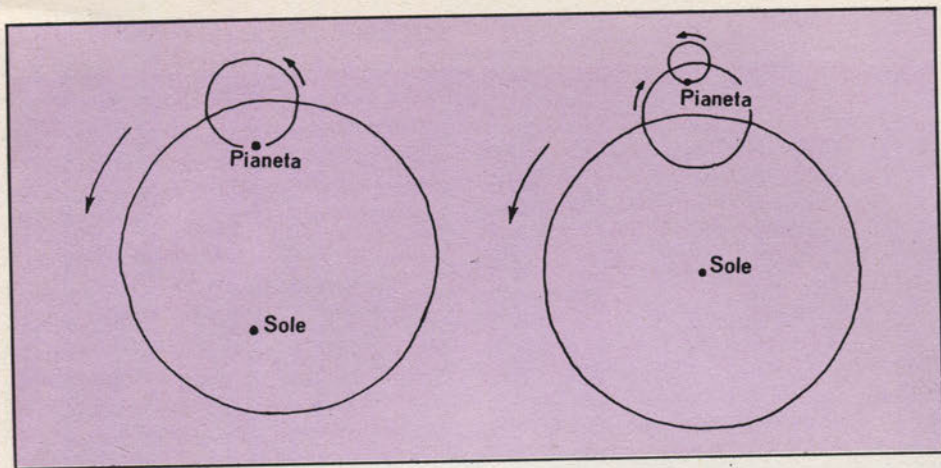



Fig. 4 *Eccentrici equivalenti ad epicicli. Precedentemente al* De Revolutionibus, *nel* Commentariolus, *Copernico aveva usato ancora omocentrici e doppi epicicli. Nel* De Revolutionibus *usa invece solo eccentrici e singoli epicidi ad essi equivalenti, risparmiando così un moto e un cerchio. Anche Tolomeo considerava equivalenti le due combinazioni.*

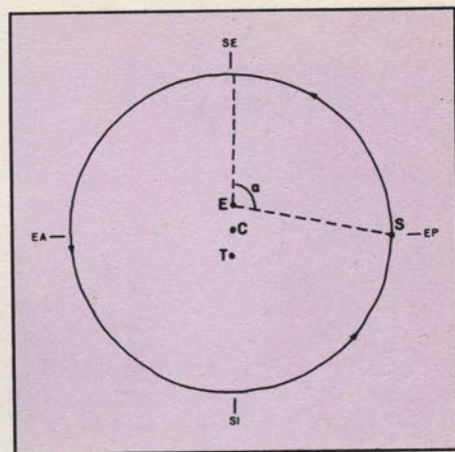



Fig. 6 *Il sole S si muove sul circolo eccentrico alla terra, ma a velocità irregolare, determinata dalla condizione che l'angolo a varia uniformemente con il tempo.*

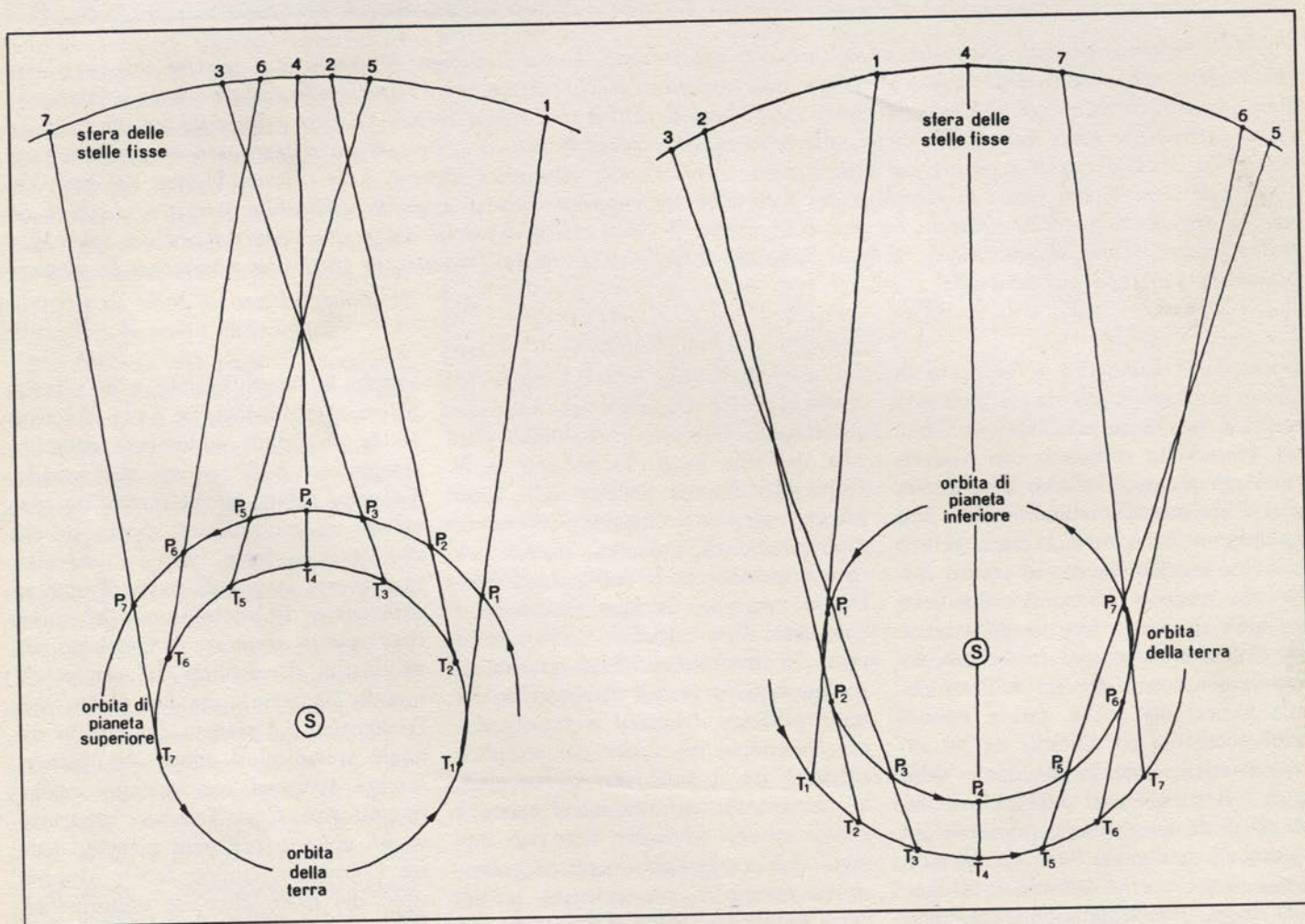



Fig. 5 *La spiegazione copernicana delle stazioni e dei moti retrogradi per pianeti superiori e inferiori mediante il moto terrestre permette l'eliminazione degli epicicli maggiori di Tolomeo. In ognuno dei due diagrammi la terra si muove costantemente sulla sua orbita da T_1 a T_7 e il pianeta si muove da P_1 a P_7. Simultaneamente la posizione apparente del pianeta contro la sfera delle stelle fisse passa ad est da 1 a 7, ma quando i due pianeti superano la terra c'è una breve retrocessione verso ovest da 3 a 5.*

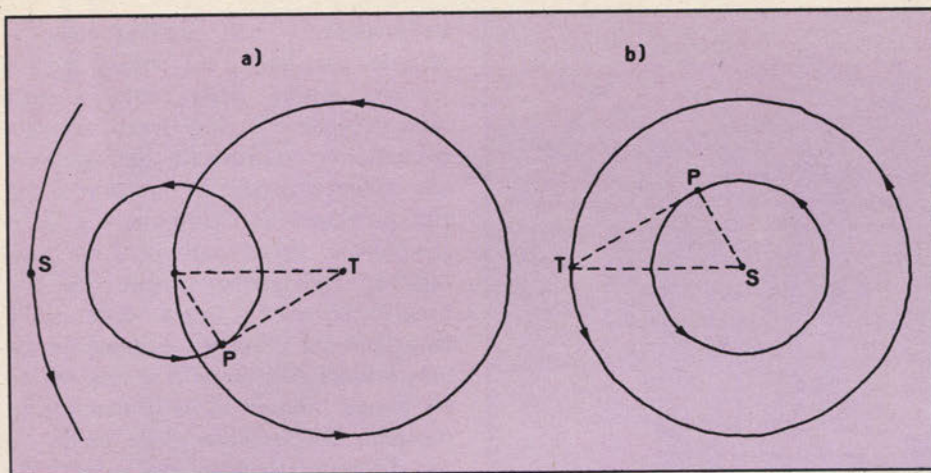



Fig. 7 *La limitata elongazione dei pianeti inferiori (Mercurio e Venere) spiegata nel sistema tolemaico e in quello copernicano. Nel sistema tolemaico (a) l'angolo fra il sole S e il pianeta P deve essere ristretto tenendo il centro dell'epiciclo sulla linea terra-sole. Nel sistema copernicano (b) con l'orbita del pianeta contenuta interamente dalla terra, tale restrizione non è necessaria e dal fenomeno della limitata elongazione dei pianeti inferiori dal sole si ricavano anzi le dimensioni delle loro orbite.*

ne dedicata a Papa Paolo III del *De Revolutionibus*, che nessun'altra ragione lo aveva indotto a pensare ad una ipotesi astronomica diversa da quella geostatica tradizionale, a fare della terra un astro mobile intorno al sole, se non che si era accorto che gli astronomi non erano coerenti con se stessi nell'indagare i moti celesti, non valendosi sempre né degli stessi principi, né delle stesse assunzioni e dimostrazioni delle rivoluzioni e dei moti apparenti. Copernico afferma infatti che tutti i sistemi escogitati dall'astronomia tradizionale erano in contrasto troppo netto con il principio del moto circolare uniforme. Qui C. ci si rivela in pieno un umanista neoplatonico, per cui si devono cercare nel mondo gli elementi che lo rendono regolare, armonico e uniforme. A questa cultura umanistica si deve anche la sua accettazione entusiastica della concezione pitagorica per cui bisogna cercare nel mondo l'ordine matematico reale, nascosto dalle apparenze sensibili, e bisogna inoltre adorare il sole come immagine perfetta e stabile di Dio al centro del mondo. Copernico ha quindi, nella stessa Prefazione a Paolo III, parole di rimprovero per gli astronomi fino a lui, che nelle loro ricerche analitiche sui singoli moti celesti sviluppavano l'astronomia non in un sistema armonico, ma in un vero mostro, le cui membra appaiono sproporzionate e giustapposte, anche se ciascuno, preso separatamente, appare ben fatto, perdendo di vista il sistema e la « forma » del mondo. Infatti l'astronomia tolemaica non permetteva di determinare né la successione precisa delle orbite planetarie, né le distanze dei pianeti dal centro del mondo e fra di loro. Copernico poteva invece stabilire per tutti i pianeti il rapporto preciso fra i loro periodi di rivoluzione e quello terrestre, e inoltre le distanze, proporzionali a tutti questi periodi di rivoluzione, fra tutti i pianeti e il sole.

Copernico e la riforma del calendario

Copernico attribuisce alla riforma del calendario, prospettata dalla chiesa cattolica, di cui era canonico, come urgente, nel Concilio Lateranense (1512-1517) sotto Papa Leone X, il motivo principale della sua opera. Si trattava di determinare a quello scopo una misura precisa dell'anno solare o tropico, per predisporre una corrispondenza a lungo termine fra esso e l'anno sidereo costante misurato dal periodo del sole lungo lo zodiaco, essendo l'anno solare o tropico legato all'inizio della primavera e al cambiamento delle stagioni. Esso va infatti da un equinozio di primavera al successivo, essendo l'equinozio il punto del cielo dove equatore celeste e circolo zodiacale si intersecano; ma l'equinozio muta di anno in anno, il suo ritorno anticipa di oltre 20 minuti il ritorno del sole, per il fenomeno della precessione degli equinozi, che Tolomeo attribuiva all'oscillazione della sfera celeste e Copernico a quella dell'asse terrestre. Il problema della precessione degli equinozi non fu però risolto da Copernico, che anzi lo complicò con l'aggiunta di nuovi dati, che cercò di spiegare con l'aggiunta di nuovi circoli. Essi furono tuttavia utili, oltre a quelli di Tyco Brahe che permisero di ridurre ad una legge relativamente semplice il fenomeno, nella compilazione del calendario gregoriano o riformato (1582). Non è facile dire quanto l'opera di Copernico sia stata effettivamente determinata da questo problema. C'è chi pensa, come A. Koyré, che C. volesse più che altro ingraziarsi il Papa interessato alla riforma del calendario, essendo invece i suoi interessi reali puramente teorici e speculativi, avendo cominciato egli ad interessarsi alla riforma dell'astronomia molto prima del Concilio Lateranense. Altri, come T. Kuhn, sottolinea invece l'attesa universale del nuovo calendario, la sua importanza sociale nel Rinascimento. Certo è che C. avverte subito il Papa nella Prefazione citata di non voler promettere più di quello che può dare per risolvere il problema.

L'equivalenza dei sistemi di Tolomeo e di Copernico

Quanto alla maggiore economica e semplicità di Copernico rispetto a Tolomeo, essa è un mito. La maggiore semplicità data dalla sostituzione degli epicicli maggiori dei pianeti con il moto di rivoluzione terrestre è annullata infatti sia dagli epicicli minori e dagli eccentrici da lui usati per ridurre tutti i moti celesti a moti circolari uniformi, nel rifiuto assoluto dell'equante tolemaico, sia dall'attribuzione alla terra, che in Tolomeo non ne aveva nessuno, di ben tre moti, di rotazione, di rivoluzione, e conico dell'asse terrestre. Quest'ultimo è dovuto, oltre che alla precessione degli equinozi, al fatto che, in mancanza di esso, l'asse terrestre dovrebbe seguire la curvatura della sfera cristallina

della terra, e non sarebbe come è, sempre parallelo a se stesso. Non è tuttavia questo della credenza nelle sfere cristalline l'unico aspetto sorprendentemente tradizionale dell'opera di Copernico, che pose le premesse per il rinnovamento dell'astronomia e della cosmologia, senza però attuarlo interamente egli stesso. Anche per Copernico infatti la sfera delle stelle fisse delimita il cosmo, è immensa ma non infinita, immensa cioè quanto basti perché non si avverta mutamento sensibile di posizione delle stelle viste da punti opposti dell'orbita terrestre, ma non di più. Copernico credeva inoltre alla circolarità perfetta dei moti celesti dovuti alle sfere cristalline, e alla loro uniformità. Egli non poteva quindi, data l'equivalenza matematica dimostrata della sua astronomia rispetto a quella di Tolomeo, risolvere e determinare un moto celeste particolare meglio di Tolomeo, non essendoci osservazioni astronomiche note che potessero decidere fra la sua astronomia e quella di Tolomeo, prima della scoperta della parallasse stellare fatta da Bessel nel 1938. Solo Keplero svilupperà una teoria, per cui i moti planetari avvengono secondo ellissi e non cerchi, con velocità varianti con la distanza dal sole, incommensurabilmente superiore a quella di Tolomeo dal punto di vista osservativo.

Fig. 8 *Determinazione delle dimensioni relative delle orbite nel sistema copernicano per i pianeti inferiori (a) e per i pianeti superiori (b). a)* $\widehat{PTS}$ *= angolo della massima elongazione apparente dal sole→* $\widehat{SPT}$ *= 90°;* $\overline{ST}$ *= distanza terra-sole, nota. b)* $\overline{STP}$ *= allineamento sole-terra-pianeta sul piano dello zodiaco;* $\widehat{SP'T'}$ *= angolo di massima elongazione apparente della terra dal sole vista dal pianeta→* $\widehat{ST'P'}$ *= 90°;* $\widehat{TST'}$ *= angolo percorso dalla terra per raggiungere T' noto come frazione del periodo terrestre;* $\widehat{PSP'}$ *= angolo percorso nello stesso tempo dal pianeta, anche esso noto come frazione del suo periodo orbitale;* $\widehat{P'ST'} = \widehat{TST'} - \widehat{PSP'}$; $\overline{ST'}$ *= distanza sole-terra, nota.*

Fig. 9 *La precessione degli equinozi. Il polo celeste (N-S) si muove una volta ogni 26.000 anni lungo un circolo nella sfera delle stelle fisse (cammino precessionale del polo celeste). Il centro del circolo è il polo dell'eclittica (zodiaco) immobile da cui tutti i punti sul circolo sono a 23°30'. Questa è l'inclinazione fra l'eclittica che sembra ruotare intorno al suo polo immobile e l'equatore celeste che sembra ruotare intorno al polo celeste e muoversi con esso. A questo moto si deve la precessione degli equinozi (EP equinozio di primavera ed EA equinozio di autunno), punti di intersezione fra equatore ed eclittica, per cui l'anno sidereo (l'intera eclittica) non coincide con l'anno tropico (da un equinozio di primavera al successivo). Per far quadrare fra di loro i 2 anni, in base allo studio accurato del fenomeno, il calendario di Papa Gregorio XIII (1582) soppresse 10 giorni (5X-14X) del 1582 e stabilì a differenza di quello giuliano, che non fossero bisestili gli anni inizi di secolo le cui prime due cifre non fossero divisibili per 4 (1700, 1800, 1900).*

Copernico e la nuova scienza della natura

È certo tuttavia che Copernico, permettendo una determinazione non arbitraria e quantitativa del sistema solare nel suo complesso, e non solo dei singoli fenomeni celesti separati, e riaffermando lo stretto legame fra astronomia matematica e cosmologia, come teoria della forma del mondo, che si era perduto nell'astronomia tradizionale, apriva la strada a quella scienza matematica della natura che riconoscerà in lui, da Galileo e Keplero in poi, il suo precursore. Lo farà anche se non potrà trovare in lui, troppo occupato a studiare la geometria dei cieli, ma dovrà darsi da sé, risposte esaurienti a quelle obiezioni fisiche al moto della terra che parevano compromettere la rivoluzione copernicana. La dinamica fisica di Copernico si limi-

Fig. 10 *Il primo moto (a) di rivoluzione annua non tiene l'asse terrestre parallelo a se stesso, cosicché il moto conico mostrato in b) è richiesto, oltre che dalla precessione degli equinozi, per mantenere l'asse parallelo.*

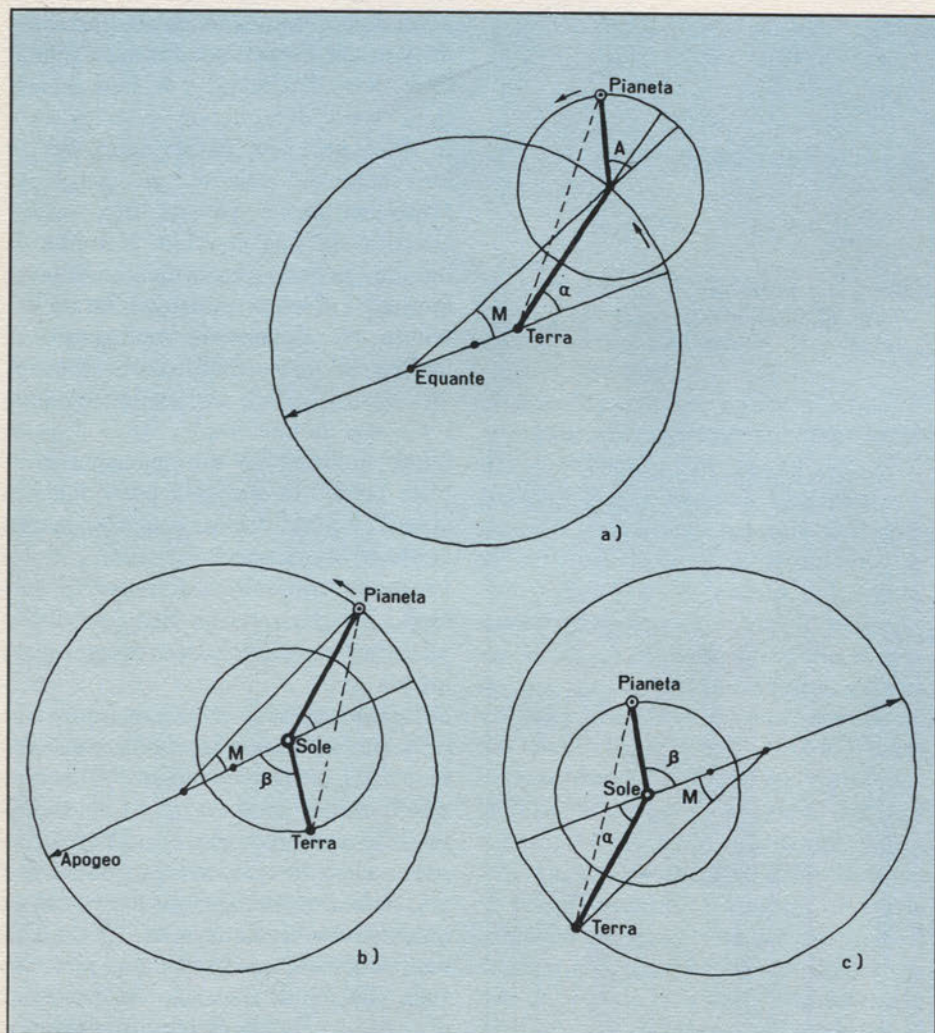



Fig. 11 *Equivalenza geometrica delle ipotesi di Tolomeo e di Copernico. a) costruzione di Tolomeo; b) costruzione copernicana per Marte, Giove e Saturno; c) costruzione copernicana per Mercurio e Venere.*

tava infatti, vicina ora alla magia naturale ora alla geometria mistica dei pitagorici, ad affermare che nel cosmo, concepito ancora chiuso e finito anche se più grande di quello degli antichi, una sfera è per sua natura soggetta al moto circolare, e che corpi simili tendono a unirsi sempre a corpi simili, cosicché ciò che è sulla superficie terrestre resta sempre unito alla terra, anche se questa si muove, e la terra stessa, sebbene ruoti vorticosamente su se stessa, resta unita, perché invincibile è l'unione delle sue parti. Ancora lontani siamo dai principi di inerzia e di relatività del moto di Galileo, che possono rispondere adeguatamente a quelle obiezioni. Questi si impegnò infatti, scontrandosi anche con le gerarchie della Chiesa cattolica interessate a conservare la gerarchia tradizionale del mondo basata sul senso comune, non come astronomo matematico, ma prima come osservatore e poi soprattutto come fisico — matematico, a giustificare l'idea di Copernico, innamorato com'era dell'intuizione che essa conteneva di una realtà armonica e matematicamente strutturata nascosta dalle apparenze, fedele in ciò alla piú costante ispirazione dell'opera di Copernico.

NOTA BIBLIOGRAFICA

La traduzione italiana del *De Revolutionibus* è annunciata nella collana *I classici della Scienza* U.T.E.T., Torino.

Sui precursori: 1. Sir Thomas L. Hearth, *Aristarcus of Samos*, Oxford, 1913. 2. G.V. Schiaparelli, *I precursori di Copernico nell'antichità*, in *Scritti sulla storia dell'astronomia*, Bologna, 1927.

Sulla storia dell'astronomia in generale: 1. J.L.E. Dreyer, *Storia dell'astronomia da Talete a Keplero*, Milano, 1970. 2. P. Duhem, *Le Système du monde*, Parigi, 1913.

Sull'ambiente culturale della rivoluzione copernicana e la sua condanna teologica: 1. A. Koestler, *The Sleepwalkers, A History of Man's changing Vision of the Universe*, Londra, 1959. 2. G. de Santillana, *Processo a Galileo* (Milano, 1960).

Monografie sulla figura e sull'opera di N. Copernico: 1. A. Koyré, *La rivoluzione astronomica*, Parte I, Milano, 1966. 2. T. Kuhn, *The Copernican Revolution*, Cambridge, U.S.A., 1957.

Sull'equivalenza di Tolomeo e di Copernico e sulla superiorità di Keplero: D.J. de S. Price, *Contra-Copernicus* in *Critical Problems in the History of Science*, Madison, U.S.A., 1959.

Sulla fisica e la cosmologia di Copernico: E. Zilsel, *Copernicus and Mechanics*, « Journal of the History of Ideas », 1940, 113-118.